

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С3486

Л-745

1836/a-79

14/v-79

P13 - 12195

В.Л.Ломидзе, Ю.Н.Пепельшев, А.Д.Рогов,
Е.П.Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ
МОЩНОСТИ И ВИБРАЦИЙ
ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

1979

P13 - 12195

В.Л. Ломидзе, Ю.Н. Пепельшев, А.Д. Рогов,
Е.П. Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ
МОЩНОСТИ И ВИБРАЦИЙ
ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Ломидзе В.Л. и др.

P13 - 12195

Физический пуск реактора ИБР-2. Корреляционный анализ флуктуаций мощности и вибраций подвижного отражателя

Обсуждается часть программы физического пуска реактора ИБР-2, относящаяся к статистической обработке случайных процессов, измеренных в импульсном режиме работы реактора на мощности не выше 300 Вт. Исследуются характер флуктуаций энергии импульса, поперечные колебания лопасти подвижного отражателя (ОПО), флуктуации скорости вращения ОПО, шумы реактивности, обусловленные циркуляцией воды в замедлителях, влияние на реактивность рассогласования во вращении ОПО и дополнительного подвижного отражателя (ДПО), а также взаимная корреляция процессов и их зависимость от средней скорости вращения ОПО и средней мощности реактора. Найдены спектральные и корреляционные характеристики анализируемых процессов. Коррелируемые флуктуации мощности обусловлены главным образом поперечными вибрациями ОПО. Разброс энергии импульса (стандартное отклонение) на мощности 100 Вт и выше не превышает 10%. Вибрационные характеристики модулятора реактивности и нестабильность вращения роторов ОПО и ДПО находятся в пределах нормы. Поведение всей установки в целом удовлетворяет проектным требованиям.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Lomidze V.L. et al.

P13 - 12195

IBR-2 Reactor Physical Start-Up. Pulse Power Fluctuations and Moving Reflector Vibration Correlation Analyses

The part of IBR-2 reactor physical start-up program concerning the statistical treatment of random processes measured at a pulse regime of operation of the reactor at mean power no more than 300 W is discussed. Peak power excursions, axial and angular oscillations of moving reflectors, reactivity fluctuations due to the water flow in moderators, and the correlations of processes are investigated at various mean power levels and rotating rates of the reflector. Spectrum, correlation and other characteristics of processes analyzed were calculated. The most correlation found was between the pulse power and axial vibrations of the main moving reflector. A standard deviation for the energy of the pulse was no more than 10% at a mean power more than 100 W. The pulse stability and behaviour of the moving reflectors are satisfactory.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В работе обсуждается часть программы физического пуска импульсного реактора ИБР-2^{1/1}, которая относится к статистической обработке различных случайных процессов, имеющих место при нормальной работе реактора. Исследуются характер флуктуаций энергии импульсов мощности, поперечные колебания лопасти основного подвижного отражателя /ОПО/, флуктуации скорости ОПО, шумы, обусловленные протоком воды в замедлителях, рассогласование во вращении дополнительного подвижного отражателя /ДПО/ и ОПО, а также взаимосвязь этих процессов и их зависимость от скорости вращения ОПО и средней мощности реактора.

1. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сбор экспериментальных данных осуществлялся посредством записи поступающих с соответствующих датчиков дискретных сигналов на магнитную ленту малой ЭВМ (PDP-11/20) с параллельным выводом оперативной информации о регистрируемых процессах. Затем записанная информация обрабатывалась на большой ЭВМ /CDC-6500 / ВЦ ОИЯИ с помощью специальной программы /КАИР/, предназначенной для анализа стационарных случайных процессов в импульсном реакторе периодического действия*.

* Чтение и преобразование данных, записанных на ленте, к виду, удобному для обработки на ЭВМ CDC-6500, осуществляет подпрограмма RTAPE.

Программа КАИР обрабатывает два параллельных случайных процесса: Q /энергия импульса мощности/ и x /побочный процесс, в качестве которого могут быть: поперечные смещения з ОПО, скорость v ОПО и угол ϕ рассинхронизации во вращении ОПО и ДПО/. Оба процесса записываются на магнитную ленту в виде одного файла длиной 80 блоков по 256 слов в каждом. Числа Q_n имеют нечетные номера n , x_n - четные. В каждом блоке содержится, соответственно, 128 чисел Q_n и столько же x_n . Объем выборки Q /как и x / не превышает, таким образом, $80 \cdot 128 = 10240$.

В процессе обработки осуществляется оценка основных свойств случайного процесса Q^* /тесты нормальности, стационарности, наличия тренда/, которая требует вычисления моментов $\overline{Q^k}$ / $k = 1, 2, 3, 4$ / и локальных средних $\overline{Q(t)}$, $\overline{Q^2(t)}$. Значения Q_n , для которых

$$|Q_n - \overline{Q}| > 4\sigma_Q, \quad /1/$$

где σ_Q - стандартное отклонение, считаются выбросами и при корреляционном анализе заменяются на среднее $\overline{Q(t)}$. Значениями $\overline{Q(t)}$ заполняются также "пустые" промежутки в массиве чисел Q_n . Такая необходимость может появиться вследствие того, что поблочное накопление в памяти малой ЭВМ поступающей с датчиков информации периодически прекращается на время δt , в течение которого производится запись накопленной группы импульсов на магнитную ленту. Если $\delta t > 1/f_0$, где f_0 - частота следования импульсов, то пропущенные импульсы, число которых $f_0 \delta t$, следует вставить в прочитанный с ленты массив чисел в виде значений, определяемых уже самой программой.

Основная цель спектрального и корреляционного анализа исследуемых процессов заключается в вычислении плотностей распределения $M(Q)$ и $M(\Delta Q)$, где $\Delta Q = Q_{n+1} - Q_n$, а также автокорреляционной функции

$$\Gamma(t) = \frac{1}{N-K} \sum_{n=1}^{N-K} (Q_n - \overline{Q}_n)(Q_{n+k} - \overline{Q}_{n+k}), \quad /2/$$

взаимной корреляционной функции

* Анализ процесса x идентичен.

$$\Gamma_{qx}(t) = \frac{1}{N-K} \sum_{n=1}^{N-K} (Q_n - \overline{Q}_n)(x_{n+k} - \overline{x}_{n+k}), \quad /3/$$

спектральной плотности^{/2/}

$$\tilde{G}(f) = 2\Delta t \{ \Gamma_0 + 2 \sum_{j=1}^{m-1} \Gamma_j \cos(\frac{\pi k}{m} j) + (-1)^k \Gamma_m \}, \quad /4/$$

В этих формулах $\Delta t = 1/f_0$ - период опросов, $t = k\Delta t$ - интервал времени между импульсами Q_n и Q_{n+k} ($0 \leq k \leq m$), m - число значений Γ , Γ_{qx} , Q ; $\Gamma_j = \Gamma(j\Delta t)$, N - объем выборки ≤ 10240 ; $f = f_c k/m$ - частота, $f_c = f_0/2$ - частота Найквиста ($0 \leq f \leq f_c$).

Выражение /4/ дает первичную оценку спектральной плотности $\tilde{G}(f_c \frac{k}{m}) = \tilde{G}_k$. Сглаженные значения G_k определяются следующим образом:

$$G_0 = (\tilde{G}_0 + \tilde{G}_1)/2, \quad G_m = (\tilde{G}_{m-1} + \tilde{G}_m)/2, \quad /5/$$

$$G_k = (\tilde{G}_{k-1} + 2\tilde{G}_k + \tilde{G}_{k+1})/4, \quad 0 \leq k \leq m-1. \quad /6/$$

Поскольку Q и x являются дискретными случайными процессами /соседние импульсы Q_n и Q_{n+1} разделены фиксированным промежутком времени $\Delta t = 1/f_0$ /, то область определения $G(f)$ ограничена сверху частотой^{/2/} $f_c = 1/2\Delta t = f_0/2$. Частоты $f > f_c$ оказываются "свернутыми" в промежуток $(0, f_c]$, т.е. появляются в спектре $G(f)$ в замаскированном виде. Нетрудно показать, что под частоту $f_R \in (0, f_c]$ в спектре $G(f)$ могут быть замаскированы реальные частоты^{/2/}:

$$f = n f_0 \pm f_R \quad (n = 1, 2, \dots) \quad /7/$$

$/f = f_R$ при $n=0$ /. Практически важной задачей является определение истинных /резонансных/ частот f .

Из /7/ следует, что эта задача сводится к определению числа n . Процедура "размаскировки" резонансных пиков, предусмотренная в программе, основывается на предположении, что частоту следования импульсов f_0 /частоту опросов/ можно менять, не искажая исследуемого случайного процесса. Тогда изменение частоты f_0 вызывает такое смещение резонанса f_R /в общем случае меняется и число n /, что левая часть /7/

остаётся неизменной. Этот принцип положен в основу размаскировки и большой группы резонансов. Для полной идентификации замаскированных резонансов помимо набора частот f_0 необходимо задать максимальную частоту f_{\max} в реальном спектре. В описываемых ниже экспериментах $f_{\max} = 2000$ Гц, а частота f_0 менялась, как правило, от 46,5 до 49,5 Гц с интервалом 1 Гц /за счет изменения скорости вращения ОПО/.

В процессе проведения эксперимента величина f_0 может флуктуировать и тем самым искажать спектр $G(f)$. Если флуктуации f_0 малы, то относительное смещение резонанса f_R

$$\Delta f_R / f_R = 2 \Delta v^2_v, \quad /8/$$

где Δv^2_v - относительная дисперсия скорости вращения ОПО /частоты f_0 /.

Флуктуации энергии импульса Q и механические флуктуации /смещений z , скорости v , угла рассинхронизации ϕ / измеряются непосредственно. Вклад процессов z , v , ϕ в относительный разброс энергии импульса $\Delta_{qz} = \sigma_q / \bar{Q}$ (σ_q^2 и \bar{Q} - дисперсия и среднее значение энергии) оценивается по формулам:

$$\Delta_{qz} = \frac{4B-1}{2\epsilon_{m0}} \frac{dk}{dz} \sigma_z, \quad /9/$$

$$\Delta_{qv} = (1 + \frac{4}{3} B) \Delta_v, \quad /10/$$

$$\Delta_{q\phi} = \frac{4B-1}{2\epsilon_{m0}} \alpha_{\text{дпо}} \sigma_{\phi}^2, \quad /11/$$

а соответствующие эффекты реактивности с помощью соотношения:

$$\Lambda_{\epsilon_x} = (2B - 1/2)^{-1} \Lambda_{qx} \quad (x = z, v, \phi), \quad /9a/$$

где $\Lambda_{\epsilon_x} = \sigma_{\epsilon_x} / \epsilon_{m0}$, ϵ_{m0} - равновесная импульсная надкритичность. Для параболических коэффициентов реактивности $\alpha_{\text{опо}}$ и $\alpha_{\text{дпо}}$, среднего времени жизни мгновенных нейтронов τ , эффекта

единичного смещения ОПО к активной зоне dk/dz , величины ϵ_{m0} , коэффициента $B = \epsilon_{m0}^{3/2} / \sqrt{\alpha_{\text{опо}} v^2 \tau}$ и скорости ОПО v использовались следующие значения:

$$\alpha_{\text{опо}} = 10^{-4} \text{ 1/град}^2 = 0,33 \cdot 10^{-4} \text{ 1/см}^2,$$

$$\alpha_{\text{дпо}} = 10^{-5} \text{ 1/град}^2,$$

$$\tau = 80 \text{ нс},$$

$$dk/dz = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/мм},$$

$$B = 2 \text{ /при } f_0 = 50 \text{ Гц/}, B = 4 \text{ /при } f_0 = 5 \text{ Гц/}, \quad /12/$$

$$\epsilon_{m0} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ /при } f_0 = 50 \text{ Гц/},$$

$$\epsilon_{m0} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ /при } f_0 = 5 \text{ Гц/},$$

$$\sqrt{\alpha_{\text{опо}} v^2} = 180 \text{ с}^{-1}.$$

1.1. Входные данные программы

- NREC - число блоков, которые следует прочитать с ленты. Ошибка выбора NREC > 80 исправляется автоматически.
- LREC - число слов Q_n /или x_n / в блоке /128/.
- NGSKIP - количество слов Q_n /или x_n /, которые следует, при необходимости, пропустить перед началом чтения.
- INS - число слов, которые следует вставить между двумя соседними блоками.
- MASSIV - объем выборки $Q(x)$ /≤10240/. Введение этого числа, наряду с NREC, необходимо для "расширения" файла при заполнении "пустых" промежутков (INS).
- LDT - число импульсов $Q_n(x_n)$, необходимое для оценки локальных средних: $Q(t)$, $Q^2(t)$ и т.д.
- FMAX - максимальная частота, ожидаемая в исследуемом случайном процессе /Гц/.
- EPSILN - относительная статистическая погрешность измерения автокорреляционной функции /0,15 ÷ 0,2/. Задание этой величины позволяет автоматически выбирать интервал корреляции.
- JMAX - число анализируемых серий /выборок/ Q /или x /.
- AN(J), $J \leq JMAX$, - частоты f_0 следования импульсов $Q_n(x_n)$ в экспериментах 1,2,... JMAX /Гц/.

“Ключи”, используемые в программе, означают следующее:

- KEY1=0 - процедура “размаскировки” /определения истинных частот/ резонансов спектральной плотности не требуется.
- KEY2=0 - процедура “размаскировки” только главного резонанса не требуется.
- KEY3=0 - вывод на печать /графопостроитель/ данных об автокорреляционной функции, спектральной плотности, взаимной корреляционной функции и плотности распределения не требуется.
- KEYQX=0 - анализ обоих процессов Q и x не требуется /анализируется только процесс Q /.
- KEYNQX=0 - вычисление взаимной корреляционной функции не требуется.
- KEYX=0 - анализ только побочного процесса (x) не требуется.

Присвоение ключу KEY отличного от нуля значения изменяет смысл ключа на обратный.

1.2. Выходные данные

На печать /дисплей, графопостроитель/ выводится следующая информация.

1. Общая характеристика случайного процесса /стационарность, нормальность, наличие тренда/, а также моменты $\overline{Q^k}$, $k = 1, 2, 3, 4$. Степень стационарности процесса характеризует выводимая на печать зависимость дисперсии от времени; для остальных двух характеристик предусмотрена текстовая информация.

2. Значения Q_n случайной переменной, которые являются выбросами, и соответствующие им номера n.

3. Плотности распределений $M(Q)$ и $M(\Delta Q)$ с их основными характеристиками.

4. Функции $\Gamma(t)$, $\Gamma_{qx}(t)$, $G(f)$, $\overline{Q(t)}$, $\overline{Q^2(t)}$.

5. Список размаскированных резонансных частот, а также таблица исходных /замаскированных/ резонансов $FR(J, k)$, где k - номер резонанса, J - номер эксперимента /серии импульсов Q с частотой следования $f_0(J)$ /.

Такая же информация выводится и для процесса x, ($x = z, v, \phi$).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперименты проводились при двух частотных режимах работы реактора: 50 и 5 Гц. В режиме 50 Гц ДПО заторможен в физическом центре и вращается только ОПО /скорость вращения ОПО изменялась в пределах от 46,5 до 49,6 с⁻¹ /. В режиме 5 Гц вращаются оба подвижных отражателя, что приводит к появлению дополнительного эффекта реактивности, вызванного рассинхронизацией во вращении ОПО и ДПО. Частота следования импульсов f_0 в последнем случае не менялась и поддерживалась на номинальном уровне 4,96 Гц. Мощность реактора не превышала 300 Вт.

2.1. Режим 50 Гц

В этом режиме получена наиболее полная информация о поведении реактора. Исследовались следующие случаи.

а. Взаимная корреляция мощности и поперечных колебаний ОПО

С целью исключить влияние стохастических флуктуаций все эксперименты /за исключением п.г/ проводились на мощности 300 Вт.

На рис. 1 изображены спектральная плотность мощности $G_q(f)$, поперечных колебаний ОПО $G_z(f)$ и взаимная корреляционная функция Γ_{qz} для двух частот f_0 : 48,5 и 49,6 Гц. Из рисунка видно, что ответственным за взаимную корреляцию между энергией импульса и смещением ОПО является резонансный пик при частоте ~ 16 Гц. Особенно отчетливо эта связь проявляется при $f_0 = 48,5$ Гц: оба спектра, $G_q(f)$ и $G_z(f)$, содержат явно выраженные резонансы при $f_R = 16,16$ Гц, и взаимная корреляционная функция Γ_{qz} является гармонической функцией с той же частотой 16,16 Гц. Переход на номинальную частоту $f_0 = 49,6$ Гц сопровождается сдвигом указанных резонансов вправо / $f_R = 16,53$ Гц/, причем спектр колебаний ОПО резко усложняется. Тот факт, что резонанс $f_R = 16,53$ Гц в спектре $G_z(f)$ выражен слабо, объясняется, по-видимому,

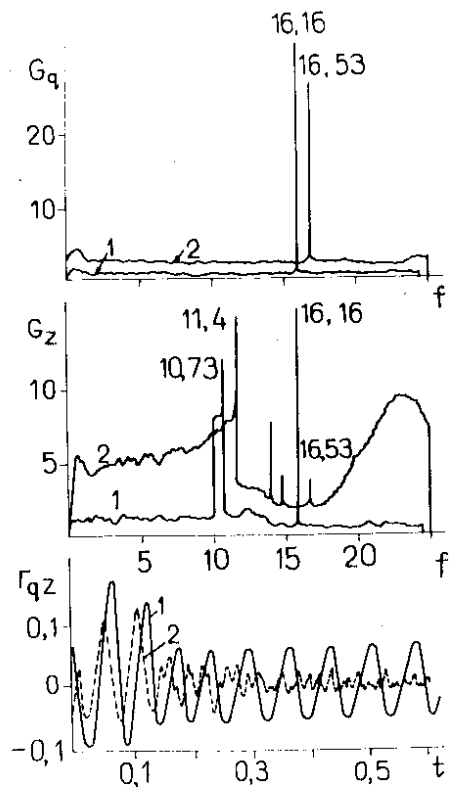


Рис. 1. Режим 50 Гц. Спектральные плотности энергии импульса G_q и поперечных смещений ОПО G_z и взаимная корреляционная функция процессов Q и z . 1 - $f_0 = 48,5$ Гц, 2 - $f_0 = 49,6$ Гц, f - частота /Гц/, t - промежуток времени между импульсами z_n и Q_{n+k} (с).

изменением фазы колебаний в месте установки датчика смещений ОПО при изменении частоты вращения f_0 .

Нетрудно установить, что под частоту $f_R = 16$ Гц могут быть замаскированы реальные частоты

$$f = (n \pm \frac{1}{3})f_0, \quad n = 1, 2, \dots \quad /13/$$

поскольку положение резонанса 16 Гц подчиняется правилу $f_R = f_0/3$, т.е. регистрируемая частота характеризует вы-

нужденные колебания ОПО. Единственным объяснением фактора $1/3$, является то, что передаточное отношение в поворотном редукторе ОПО тоже равно $1/3$. Вал поворотного редуктора, вращаясь со скоростью $f_0/3 \sim 16 \text{ с}^{-1}$ является источником вынуждающей силы, действующей на вал ОПО, очевидно, также с частотой $f_0/3$, но не с частотой $/13/$, где $n > 0$. Таким образом, в соотношении $/13/n = 0$ и, следовательно, реальная частота f колебаний ОПО /и мощности реактора/ в данном случае не является замаскированной и равна $f_R = f_0/3$.

Описанный выше механизм появления этой частоты, обусловленный дефектами в передаточных звеньях редуктора, является основной причиной флуктуаций энергии импульса на высоком уровне мощности $> 100 \text{ Вт}$. Однако эти дефекты /например, перекос ведущей шестерни/ незначительны, т.к. амплитуда вынуждающей силы, по оценкам, порядка 50 Н. Поперечные вибрации ОПО также невелики: стандартное отклонение $\sigma_z \approx 0,01 \text{ мм/см}$. табл. 1/. Соответствующий им разброс энергии импульса $\Delta_{qz} = 2\%$ /табл. 2/.

Наличие других резонансов в спектре G_z не связано с колебаниями ОПО, т.к. они не имеют соответствующих аналогов в спектре G_q . Эти резонансы обусловлены вибрацией кожуха подвижных отражателей, на котором установлен датчик смещений ОПО /вибрации кожуха практически не влияют на реактивность/. Характер этих вибраций сильно зависит от частоты /опросов/ f_0 /см. рис. 1/, поэтому процедура "размаскировки" резонансов не может быть надежной. Характер вибраций кожуха меняется также при смене положения датчика смещений.

б. Взаимная корреляция мощности и скорости ОПО

Случайное значение скорости ОПО (v_n) определялось путем измерения времени движения лопасти ОПО между двумя емкостными датчиками, разнесенными на известное угловое расстояние. Побочный процесс x представлял собой, таким образом, набор случайных значений указанного промежутка времени.

Спектр $G_v(f)$ крутильных колебаний ОПО содержит несколько ярко выраженных резонансов в области частот от 0,3 до 4 Гц и сложным образом зависит от частоты f_0 вращения ОПО. Стандартное отклонение угловой скорости ОПО состав-

ляет $\sigma_v = 0,5$ об/мин на номинальных оборотах / $f_0 = 49,6 \text{ с}^{-1} \approx 3000 \text{ об/мин}$ / и возрастает до 5 об/мин при $f_0 = 49 \text{ с}^{-1}$. Значения σ_v и соответствующие стандартные отклонения для энергии (Δ_{qv}) и реактивности ($\sigma_{\epsilon v}$), приведенные в табл. 1 и 2, соответствуют номинальной скорости вращения ОПО.

Влияние флуктуаций скорости ОПО на реактивность, как следует из табл. 2, пренебрежимо мало ($\sigma_{\epsilon v} \sim 10^{-7} \Delta k/k$).

в. Влияние циркуляции воды в замедлителях на реактивность реактора

Данный эксперимент заключался в проведении серии измерений дисперсии энергии импульсов при наличии и в отсутствие циркуляции воды в замедлителях. Относительная дисперсия Δ_{q, H_2O}^2 энергии импульсов, обусловленная влиянием циркуляции воды, оценивалась как разность указанных дисперсий /с учетом поправок на различный вклад поперечных смещений ОПО/. Нижняя оценка Δ_{q, H_2O} в табл. 2 получена в отсутствие низкочастотного тренда / < 0,5 Гц/, верхняя включает и низкие частоты /вклад которых зависит, вообще говоря, и от действий оператора, поддерживающего реактор на заданном уровне мощности/.

Таким образом, стандартное отклонение $\Delta_{q, H_2O} = /0,5 \pm 2\%$. Соответствующий вклад в реактивность $\sigma_{\epsilon, H_2O} = /1 \pm 5 \cdot 10^{-6} \Delta k/k$.

г. Зависимость флуктуаций энергии импульса от средней мощности реактора

При низких значениях средней мощности реактора /десятки ватт и менее/ преобладают стохастические флуктуации энергии импульса. На рис. 2 представлены результаты измерения относительной дисперсии Δ_{qz}^2 /значок z указывает, как и прежде, что низкочастотный тренд исключен/ при разных

* При частоте f_0 , меньшей, чем номинальное значение, электромагнитная муфта, осуществляющая сцепление вала двигателя с валом редуктора ОПО, работает в режиме "проскальзывания". На номинальных оборотах проскальзывание отсутствует. Смена режима работы муфты может привести к резкому возрастанию флуктуаций скорости ОПО.

Таблица 1

Стандартные отклонения σ_z /поперечные смещения ОПО/, σ_ϕ /рассинхронизация во вращении ОПО и ДПО/, σ_v /скорость вращения ОПО/

| f_0 , Гц | σ_z , мм | σ_ϕ , град | σ_v , об/мин |
|------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| 5 | 0,0106 | 0,2+0,3 | - |
| 50 | 0,0116 | - | 0,5 |

Таблица 2

Относительные стандартные отклонения энергии импульса Δ_q /%/ и соответствующие им расчетные значения стандартных отклонений реактивности σ_ϵ ($10^{-5} \Delta k/k$); Δ_q , Δ_{qz} , Δ_{q, H_2O} - измеренные значения стандартного отклонения /полного; за вычетом низкочастотного тренда: $f < f_0/128$; обусловленного циркуляцией воды в замедлителях/; Δ_{qz}^* , $\Delta_{q\phi}^*$, Δ_{qv}^* - оценка эффектов поперечных смещений z ОПО, рассинхронизации ϕ ОПО и ДПО и неравномерности вращения ОПО с помощью /9/-/11/ по данным табл. 1. Величина Δ_q усреднена по многим экспериментам /средняя мощность 100-300 Вт/.

| f_0 , Гц | Δ_q | Δ_{qz} | Δ_{qz}^* | $\Delta_{q\phi}^*$ | Δ_{qv}^* | Δ_{q, H_2O} |
|------------|------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 5 | 8,4 | 2,2+0,4 | 2,8+0,2 | 0,3+0,1 | - | - |
| 50 | 2,5 | 1,6+0,6 | 2,0+0,15 | - | ~0,1 | 0,5+2 |

| f_0 , Гц | σ_ϵ | $\sigma_{\epsilon z}$ | $\sigma_{\epsilon z}^*$ | $\sigma_{\epsilon\phi}^*$ | $\sigma_{\epsilon v}^*$ | σ_{ϵ, H_2O} |
|------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 5 | 1,5 | 0,4+0,07 | 0,5+0,04 | 0,06+0,02 | - | - |
| 50 | 0,7 | 0,4+0,15 | 0,5+0,04 | - | ~0,2 | 0,1+0,5 |

значениях обратной величины средней мощности W^{-1} . Экспериментальная зависимость $\Delta_{qz}^2 (W^{-1})$ имеет вид $/[W]$ в ваттах/:

$$\Delta_{qz}^2 (W^{-1}) = \Delta_{qz}^2 (0) + \frac{750 \pm 50}{W} 10^{-4}, \quad /14/$$

где $W > 0,5$ Вт, $\Delta_{qz}^2 (0)$ - экстраполированное значение дисперсии, характеризующее чисто механические флуктуации мощности при $W = \infty$. При $f_0 = 50$ Гц $\Delta_{qz}^2 (0) = /3 \pm 2/ \cdot 10^{-4}$; при $f_0 = 5$ Гц $\Delta_{qz}^2 (0) = /5 \pm 2/ \cdot 10^{-4}$.

В области критичности на мгновенных нейтронах $/\epsilon_m \approx 0$, $W = 0,02$ Вт/ дисперсия достигает максимального значения $\Delta_{qz}^2_{max} \approx 0,30$.

Значение среднего времени жизни мгновенных нейтронов, вычисленное с помощью $/14/$ и соотношения $/3/$:

$$\Lambda_{qz}^2 = \frac{0,4}{\beta W \tau} \quad /15/$$

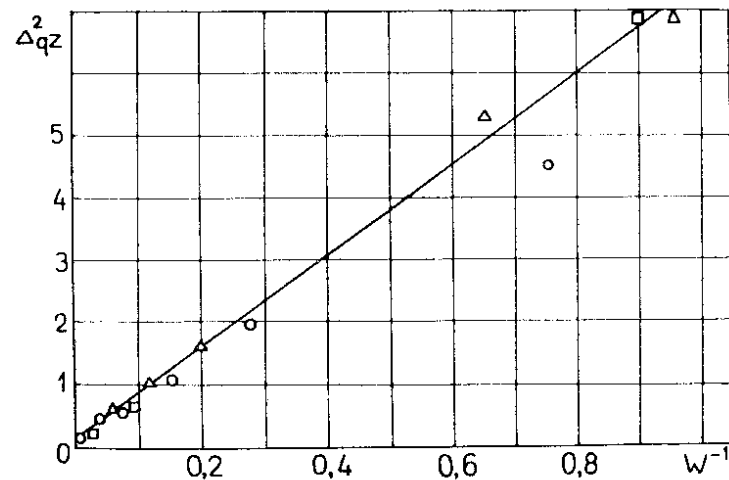


Рис. 2. Зависимость относительной дисперсии стохастических флуктуаций энергии импульса $/10^{-2}/$ от обратной величины средней мощности $W^{-1} / \text{Вт}^{-1} /$ реактора. \square - режим 5 Гц, Δ - режим 50 Гц, \circ - режим 50 Гц, водяные замедлители отсутствуют. Сплошная линия - аппроксимация $/14/$ с наклоном $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$.

$/\beta = 0,002165$ - эффективная доля запаздывающих нейтронов, W в делениях/совпадает с экспериментальными данными метода Росси - α и оценкой τ по измеренной форме импульса мощности $/\tau = 80 \pm 10$ нс/.

2.2. Режим 5 Гц

В этом режиме $f_0 = 4,96$ Гц. В качестве побочного процесса исследовались поперечные смещения z ОПО и угол ϕ рассинхронизации во вращении ОПО и ДПО. Спектры мощности и указанных процессов приведены на рис. 3. Из рисунка следует,

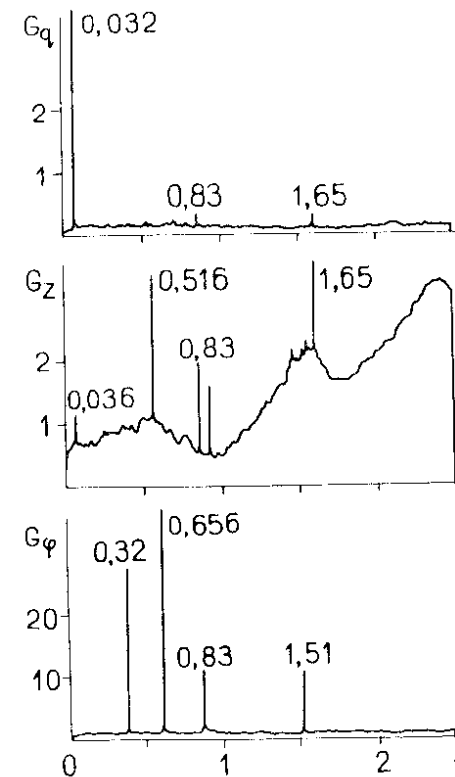


Рис. 3. Режим 5 Гц. Спектральные плотности энергии импульса G_q , поперечных колебаний ОПО G_z и угла рассинхронизации во вращении ОПО и ДПО G_ϕ . f - частота $/\text{Гц}/$, $0 < f \leq f_c = 2,48$ Гц.

что резонанс 16,53 Гц, который замаскирован теперь под частоту 1,653 Гц, не является доминирующим в спектре мощности $G_q(f)$. Доминирующим является резонанс при $f_R = 0,03$ Гц, который вызван, очевидно, вращением ДПО, изменившим картину вибраций машины в целом. Слабо выраженный пик при $f_R = 0,83$ Гц обусловлен, скорее всего, влиянием резонанса 0,83 Гц в спектре $G_z(f)$, а не в $G_\phi(f)$ /наличие двух одинаковых пиков в $G_z(f)$ и $G_\phi(f)$ является, по-видимому, случайностью/. Спектр $G_z(f)$, как видно из рисунка, существенно изменился по сравнению с режимом 50 Гц.

Ярко выраженные резонансы в спектре $G_\phi(f)$ следует рассматривать как набор реальных частот относительных крутильных колебаний ОПО и ДПО.

Среднее значение угла рассинхронизации составляет $\sigma_\phi = 0,2 \div 0,3$ град /см. табл. 1/, соответствующий вклад в реактивность $-\sigma_{\epsilon\phi} < 10^{-6}$ Ак/к /табл. 2/. Эффект поперечных смещений ОПО практически не изменился. Существенно изменилась величина Δ_q /8,4%/ . Однако Δ_q - это разброс энергии импульса, включающий в себя и медленные отклонения мощности ($f < f_0/128$), вклад которых не систематичен и может быть значительно большим по сравнению с режимом 50 Гц, поскольку время измерения возросло в 10 раз. "Быстрые" флуктуации Δ_{qz} в пределах ошибки измерений совпадают с расчетным значением Λ_{qz}^* при $dk/dz = /4,5 \pm 0,3/ \cdot 10^{-4} \text{мм}^{-1}$.

Таким образом, включение привода ДПО сильно меняет картину вибраций подвижного отражателя и флуктуаций мощности. Однако количественные характеристики флуктуаций, в сравнении с режимом 50 Гц, изменились незначительно.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что для дискового варианта ДПО неконтролируемые флуктуации мощности реактора ИБР-2, работающего без теплоносителя, малы /~ 2%/ и обусловлены, в основном, поперечными колебаниями лопасти ОПО. Полный разброс энергии импульса Δ_q , включающий в себя и медленные отклонения мощности в процессе регулирования, не превышает 10%.

Однако циркуляция натрия и постановка нового ДПО должны привести к увеличению флуктуаций из-за натриевого пустотного эффекта и появления газодинамических ударов при встречах ОПО и ДПО. Оценка натриевых шумов реактивности $\sigma_{\epsilon Na} = 5 \cdot 10^{-5} \Lambda k/k$ вполне реальна /соответствует изменению средней плотности натрия ~ 0,1%/ . Поперечные вибрации ОПО при новом ДПО возрастут, по крайней мере, в три раза. Поэтому можно ожидать, что в будущем полный разброс энергии импульса увеличится до $\Delta_q = 20\%$ в режиме 50 Гц и до $\Delta_q = 30\%$ при $f_0 = 5$ Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, РЗ-10888, Дубна, 1977.
2. Бендаш Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. "Мир", М., 1974.
3. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1979 года.